شناسایی آسیب در مسائل تنش- کرنش مسطح بااستفاده از داده‌های مودال★

علی مطهری (۱) جلال اکبری (۲)

چکیده وجود آسیب یا ترک در سازه‌ها باعث تغییر در پارامترهای مودال می‌شود و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین می‌توان از تغییر پارامترهای مودال، برای شناسایی آسیب در سازه‌ها استفاده نمود. تاکنون بیشتر تحقیقات انجام‌شده در تشخیص آسیب در مسائل یک‌بعدی نظیر تیرها متمرکز بوده‌است و تحقیقات جامعی برای شناسایی آسیب در سازه‌های دوبعدی و بالاتر وجود ندارد. به‌نظر می‌رسد، دلیل این کار مدت‌زمان بسیار زیاد تحلیل در صورت مدل سازی با روش اجزای محدود باشد که در این مقاله دو راهکار برای کاهش هزینهٔ محاسبات ارائه شده‌است. ابتدا با انجام تحلیل حساسیت از شبکه‌های اجزای محدود درشت‌تری استفاده شده‌است. در راهکار دوم به‌جای استفاده از الگوریتم ژنتیک در مسائل مورد بررسی، از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات استفاده شده‌است که زمان لازم برای تشخیص آسیب‌ها را کاهش دهد. هدف این تحقیق شناسایی وجود، مکان و شدت آسیب در سازه‌های دوبعدی تنش یا کرنش مسطح بااستفاده از ترکیب اطلاعات فرکانس‌های ارتعاشی و شکل مودهای ارتعاشی سازه‌ها می‌باشد. برای این منظور، با مدل سازی اجزای محدود سازه‌های دوبعدی با برنامه‌نویسی در محیط MATLAB اعمال سناریوهای مختلف آسیب و بااستفاده از توابع هدف پیشنهادی، مکان و شدت هر نوع آسیب احتمالی از تکنیک بهینه سازی الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود. مثال‌های عددی ارائه شده نشان می‌دهد که وجود آسیب، مکان آسیب و شدت آسیب در مسائل دوبعدی با راهکارهای ارائه‌شده به‌طور کامل قابل‌شناسایی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی شناسایی آسیب، پارامترهای مودال، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم اجتماع ذرات.

Damage Detection of Plane Strain/Stress Problems using Modal Data

A. Motahhari J. Akbari

Abstract *Damages or cracks change the natural frequencies and the mode shapes of the structures. Therefore, the modal parameters could be used in damage detection or structural health monitoring techniques. Based on the knowledge of the authors, most researches in this field have been focused on one-dimensional problems, e.g. beams, trusses, columns, and frames. It seems that the main reason for the lack of comprehensive researches is the huge computational cost for two or three- dimensional problems involved with the finite-element modeling. In order to reduce the costs, two distinct techniques have been utilized here. Firstly, instead of using the genetic algorithm method, the particle swarm optimization (PSO) technique has been applied for finding the best solution. Secondly, instead of applying the fine meshes for calculation of the modal parameters in the finite- element modeling, the course meshes are used. In this paper, the combination of the frequencies and the mode shapes as an objective function has been applied in the optimization procedure for damage detection of two-dimensional plane stress type problems. For this purpose, the finite-element computer program has been developed in MATLAB environment for the required calculations. The results show that non- gradient-based optimization techniques such as GA and PSO have been successfully detected the existence, location and the intensities of the pre-defined damage scenarios.*

Keywords: Damage detection, Modal parameters, Genetic algorithm, Particle swarm optimization

---

★ تاریخ دریافت مقاله۹۶/۱/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۸ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه ملایر.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملایر.

Email: akbari@malayeru.ac.ir

مقدمه و پیشینهٔ موضوع

وضعیت‌سنجی سلامت سازه‌ها و شناسایی عیوب سازه‌ای موضوع داغ رشته‌هایی نظیر مهندسی هوافضا، مهندسی مکانیک و مهندسی عمران می‌باشد. تحقیقات در این زمینه در سه شاخهٔ مطالعات تئوری- عددی، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات میدانی انجام می‌شود. در شاخهٔ تئوری- عددی مدل ریاضی سازه ساخته می‌شود و یک خرابی مانند کاهش سختی در آن ایجاد می‌گردد تا نقاط قوت و ضعف الگوریتم شناسایی گردد یا معیار تشخیص خرابی محک زده شود. در این شاخه نیازی به ایجاد خرابی یا آسیب واقعی نیست و کاملاً وضعیت شناسایی غیرمخرب حاکم می‌باشد. ازآنجاکه بزرگ‌ترین چالش در سلامت‌سنجی سازه‌های واقعی اعمال ورودی یا تحریک سازه می‌باشد، در شاخهٔ آزمایشگاهی مدل کوچک یا مقیاس‌شده‌ای از سازهٔ موردبررسی نظیر تیر، ستون، قاب، خرپا و غیره در آزمایشگاه ساخته می‌شود تا به‌راحتی بتوان سازه را تحریک نمود و پاسخ‌های خروجی را اندازه‌گیری نمود. در شناسایی سلامت سازه‌ای میدانی یا واقعی سازه تحت بارگذاری استاتیکی یا دینامیکی قرار می‌گیرد تا بااستفاده از فناوری‌های موجود، اطلاعات ورودی و خروجی ثبت و سلامت سازه ارزیابی شود. در روش میدانی به‌دلیل پیچیدگی سازه و گران بودن انجام آزمایش‌های تحریک، به‌طور معمول روش اندازه‌گیری از روی خروجی تنها (Output Only) بسیار رایج و اقتصادی می‌باشد.

همان‌گونه که ذکر شد، شناسایی عیب در شاخه‌های آزمایشگاهی و میدانی مستلزم هزینه‌های خرید و نصب حسگرها، دستگاه‌ها و ابزارهای تحریک و ثبت داده‌های ورودی و خروجی می‌باشد؛ بنابراین باتوجه به محدودیت‌های روش‌های تئوری- عددی، این شاخه از روش شناسایی آسیب به‌دلیل اقتصادی بودن و سرعت انجام کار همواره مورد توجه محققان مختلف بوده‌است. پژوهش‌های صورت‌گرفته در این شاخه به‌طور عمده تکیه بر ارائهٔ الگوریتم‌ها و شاخص‌هایی دارند که نه‌تنها دقت کافی در مشخص نمودن مکان و شدت آسیب‌های سازه‌ای را داشته باشند، بلکه از لحاظ بالا بودن سرعت پردازش داده‌ها و سادگی در استفاده از آنها نیز، برتری‌هایی نسبت به سایر روش‌های پیشین داشته باشند [1].

در این روش برای ارزیابی روش‌های شناسایی، مدل ریاضی سازه در دو حالت سازهٔ سالم و سازهٔ معیوب ساخته می‌شود؛ سپس بااستفاده از اطلاعات مودال این دو نوع سازه، شناسایی آسیب مورد واکاوی قرار می‌گیرد [2]. وقوع ترک یا خرابی باعث تغییر در فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی ارتعاشی، میرایی سازه و دیگر مشخصات آن می‌شود. در روش‌های شناسایی براساس مشخصات دینامیکی سازه‌ها، پارامترهای مودال نظیر فرکانس طبیعی، شکل‌های مودی و میرایی مودال توابعی از خواص فیزیکی سازه مانند جرم، میرایی و سختی می‌باشند؛ بنابراین تغییر خواص فیزیکی باعث تغییر خواص مودال خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که خطای اندازه‌گیری یا محاسبهٔ مدهای ارتعاشی به‌مراتب بزرگ‌تر از خطای محاسبهٔ فرکانس‌های طبیعی ارتعاش است. به‌علاوه، مدهای ارتعاشی اندازه‌گیری‌شده اغلب کامل نیستند، به‌طوری‌که بسط دادن مدهای ارتعاشی ضروری می‌شوند، درنتیجه احتمال زیادی وجود دارد که خطاهای اندازه‌گیری با خطاهای ایجادشده دراثر بسط مدهای ارتعاشی ترکیب شوند. اگرچه دقت اندازه‌گیری مد ارتعاشی سازه‌ای پایین‌تر از فرکانس طبیعی است، مد ارتعاشی حاوی اطلاعات بیشتری راجع به آسیب‌دیدگی است [3]. برای مثال بااستفاده از منحنی شکل مدی می‌توان محل آسیب سازه‌ای را مطابق با تغییر منحنی شکل مدی تعیین کرد. به‌عنوان مثال یکی از شاخص‌های ارائه‌شده در این حوزه معیار اطمینان مودال (Modal Assurance Criteria (MAC)) می‌باشد [4]. معیار اطمینان مودال مقادیر بین صفر تا یک را اختیار می‌کند. مقدار یک بیانگر عدم وجود خرابی در المان سازه و انحراف از این مقدار بیانگر وجود خرابی در سازه

می‌باشد. این معیار به اختلال در داده‌های مودال بسیار حساس است و در اختلال‌های بسیار ناچیز، کارایی خود را از دست می‌دهد. یک فرم تکامل‌یافتهٔ معیار اطمینان مودال، معیار اطمینان مودال مختصاتی (Coordinate Modal Assurance Criteria (COMAC)) می‌باشد [5]. این معیار برای مشخص نمودن درجات آزادی متناظر با مقادیر منفی و یا پایین‌تر از معیار مودال عمل می‌کند. قابلیت استفاده در مدل‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و تحلیلی آزمایشگاهی، از ویژگی‌های این معیار است.

برای شناسایی آسیب محققان ابتدا با کمک تعداد کمی فرکانس طبیعی، روشی را برای مکان‌یابی و تخمین اندازهٔ آسیب غیر مخرب در سازه‌ها پیشنهاد نمودند. مزیت استفاده از تغییر فرکانس طبیعی سازه‌ای در تشخیص آسیب اندازه‌گیری ساده و دقت بالای آن بود؛ لیکن اندازه‌گیری فرکانس طبیعی نمی‌تواند اطلاعات کافی برای تشخیص آسیب سازه‌ای به‌دست دهد. علاوه‌بر این، فرکانس طبیعی اغلب حساسیت کافی به آسیب‌های اولیه در سازه‌ها را ندارد. به‌طور معمول این روش فقط می‌تواند وجود آسیب‌های بزرگ را تعیین نماید و قادر به شناسایی محل آسیب نخواهد بود، زیرا آسیب سازه‌ای در مکان‌های مختلف ممکن است تغییر فرکانس یکسانی را ایجاد کند. آکتان و همکاران پیشنهاد کردند که تغییرات فرکانس به‌تنهایی نمی‌تواند به‌طور خودکار خرابی را تعیین نماید [6]. بااین‌وجود، ادعای برخی محققان این است که فرکانس‌های طبیعی موفق عمل می‌کنند؛ برای مثال آدامز موفقیت خوبی را در شناسایی خرابی در ارتباط با یک سازهٔ یک‌بعدی گزارش نمود [7]. برش‌های اره‌ای کوچک بااستفاده از تغییرات سه فرکانس اول برای تیر-های ساده، تیر با ارتفاع متغیر و یک میلهٔ دندانه‌ای شناسایی و مکان‌یابی شد. استوبس و همکاران روشی برای شناسایی خرابی براساس حساسیت فرکانس‌های طبیعی به خرابی ارائه نمودند [8]. در تحقیق آنها بااستفاده از داده‌های فرکانسی اندازه‌گیری‌شده یک تیر طره و ماتریس‌های حساسیت محاسبه شد و میزان و محل خرابی تعیین گردید. چن و همکاران بااستفاده از تکنیک اغتشاش روشی را برای محاسبهٔ دقیق حساسیت‌های فرکانس‌های طبیعی نسبت به سختی ارائه نمودند [9]. تغییرات شکل مودی به‌صورت ترکیبی خطی از شکل مودهای سازهٔ سالم بیان شد و در محاسبهٔ حساسیت فرکانس‌های طبیعی درنظر گرفته شد.

نمونه‌های موجود که از روش تحلیل حساسیت برای تشخیص آسیب سازه‌های واقعی مبتنی بر فرکانس طبیعی و شکل مودی استفاده نموده‌اند، نشان می‌دهند که حساسیت کاهش سختی در المان‌های مختلف با فرکانس و شکل مودی متفاوت است و برای بیشتر روش‌های تشخیص آسیب، لازم است که مدهای ارتعاشی سازه‌ای اندازه‌گیری شوند؛ به‌عنوان نمونه یانگ و همکاران یک روش تشخیص آسیب را بااستفاده از خاصیت تغییرناپذیری انرژی کرنش مودال ارائه نموده‌اند [10]. در این روش دو شاخص تشخیص آسیب تعریف می‌شود. یکی از آنها نسبت تغییر انرژی کرنشی مودال فشاری و دیگری نسبت تغییر انرژی کرنشی مودال خمشی است. انرژی کرنشی مودال موجود به‌کمک شکل مودی و ماتریس سختی سازه‌ای ناقص به‌دست می‌آید. خو و همکاران تکنیک تحلیل مودال را برای مکان‌یابی آسیب در یک سازه با دیوار چوبی بااستفاده از ارزیابی پارامترهای حساس به آسیب مانند انتقال قطب رزونانسی و شکل‌های مودی ارائه نموده‌اند [11]. در روش آنها، ناحیهٔ آسیب‌دیده با مقایسهٔ شکل مدی تغییرشکل‌ها قبل و بعد از آسیب‌دیدگی شناسایی می‌شود. تغییرات باقی‌ماندهٔ مودال و سختی نیز برای بهتر نشان دادن محل آسیب تعیین می‌شوند. فریبا و همکاران از معیار اطمینان مودال مختصاتی برای کنترل کیفیت ترمیم انجام‌شده در یک پل بتنی که روی تکیه‌گاهش جابه‌جا شده بود، استفاده نمودند [12]. مودهای سازهٔ آسیب‌دیده و سازهٔ تعمیرشده باهم مقایسه شد تا معلوم گردد که تعمیر به‌خوبی انجام شده‌است. نارایانا و همکاران، با بررسی

اثرات تغییرات موضعی و کلی پارامترهای مودال، موقعیت ترک را در یک تیر طره مشخص نمودند [13]. در تحقیق آنها مدل مورد استفاده، به‌صورت اجزای محدود و با درنظر گرفتن یک ترک در آن ایجاد گردید. نتایج حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌داد که پارامتر شکل‌های مودی و تغییرات آن، ممکن است به‌تنهایی برای تعیین موقعیت ترک در سازه مؤثر و کارا نباشد. بنابراین، تغییرات در فرکانس‌های مربوط به مودهای اصلی، عامل ضروری دیگری است که وجود آنها منجر به کسب نتایج رضایت‌بخش می‌شود. لیو و همکاران یک روش به‌هنگام‌سازی برای محاسبهٔ پارامترهای جرم و سختی یک خرپا بااستفاده از فرکانس-ها و شکل مودهای مودال با حداقل نمودن خطای مرتبه‌دوم نیروی مودال ارائه نمودند [14]. با این روش نویسندگان نشان دادند که چنان‌چه اطلاعات مودال مناسبی در اختیار باشد، می‌توان پارامترهای هر المان را بااستفاده از فرکانس‌های مودال و شکل‌های مودی اندازه‌گیری‌شده و دو ماتریس که نشان‌دهندهٔ جهت المان‌ها در فضا و چگونگی اتصال المان‌ها می‌باشند، به‌دست آورد. در این روش نشان داده شد که پارامترهای المان‌ها منحصربه‌فرد است و در حالت کلی کمینه می-شود. این روش برای تعیین المان‌های آسیب‌دیده در یک خرپا بااستفاده از چهار شکل مودی، مورد استفاده قرار گرفت. دنیل‌دسی و گابریل در سال ۲۰۱۵ روشی براساس انحنای مودشکل‌ها برای شناسایی آسیب در سازه‌ها ارائه نمودند [15]. ازآنجاکه انحنای مودشکل‌ها به تغییرات پارامترهای دینامیکی بسیار حساس می‌باشد، می‌توان از آن برای تعیین آسیب در سازه‌ها استفاده نمود. طبق یافته-های گابریل و دنیل‌دسی، شاخص آسیب انحنای شکل مود درنظر گرفته شد که با بررسی فرکانس طبیعی و انرژی کرنشی مودال در حالت سازهٔ سالم و سازهٔ آسیب-دیده موقعیت ترک در تیر مشخص گردید. چانگ و کیم بااستفاده از شناسایی پارامترهای مودال براساس ارتعاش، روشی برای تشخیص خرابی در سازه ارائه نمودند [16]. کیم و همکاران [17]، لی و چانگ [18] و نامی و همکاران [19] از اطلاعات فرکانس‌های ارتعاش و شکل مودها در سازه‌های تیرشکل و یک‌بعدی برای شناسایی آسیب استفاده نمودند.

همان‌طور که از بررسی تحقیقات مشاهده می‌گردد، در بخش تئوری- عددی شناسایی آسیب در سازه‌های یک‌بعدی مانند تیر یا خرپا به‌طور جامع بررسی شده‌است. نویسندگان مقالهٔ حاضر احتمال می‌دهند عدم وجود تحقیقات جامع برای شناسایی آسیب در سازه‌های دوبعدی و سه‌بعدی زمان محاسباتی سنگین در هنگام استفاده از روش اجزای محدود می‌باشد. به‌طوری‌که در این مقاله هم این موضوع نشان داده شده‌است. برای کاهش زمان محاسبات ابتدا از الگوریتم اجتماع ذرات (Particle Swarm Optimization (PSO)) به‌جای تکنیک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است. این کار هزینهٔ محاسبات را تاحدودی کاهش داده‌است. راهکار بعدی که منجر به کاهش بهتر هزینهٔ محاسبات شده‌است، استفاده از شبکه‌های المان محدود با ابعاد بزرگ‌تر می‌باشد. هرچند با افزایش ابعاد المان‌ها دقت محاسبات کاهش می‌یابد، لیکن ترکیب فرکانس‌های ارتعاشی و شکل مودها در شبکه‌بندی درشت، به‌خوبی قادر است المان‌های معیوب را شناسایی نماید. متغیر طراحی در فرایند شناسایی، تعداد و شمارهٔ المان‌های شبکهٔ اجزای محدود می‌باشد. به‌منظور شناسایی آسیب در سناریوهای مختلف درنظر گرفته‌شده، برنامه‌ای در محیط MATLAB نوشته شده‌است [20]. برای تحلیل اجزای محدود از المان‌های چهارضلعی و چهار گرهی استفاده شده‌است. در مدل‌سازی عددی در این مقاله اثرات حرارت در مسائل موردمطالعه بررسی شده‌است. تکنیک‌های بهینه‌سازی شامل الگوریتم ژنتیک و روش

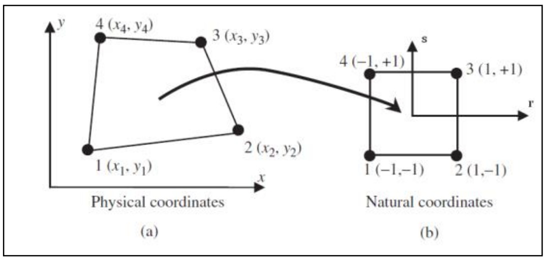
اجتماع ذرات است و تابع هدف در روش بهینه‌سازی استفاده از داده‌های مودال سازهٔ سالم و سازهٔ معیوب می‌باشد. این تابع هدف به‌صورت ترکیب هم‌زمان فرکانس‌های ارتعاش و شکل مودهای سازه‌های سالم و معیوب می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که حتی با شبکه‌بندی درشت، تابع هدف انتخاب‌شده به‌خوبی توانسته‌است المان‌های معیوب و محل و شدت آنها را شناسایی نماید.

روش انجام تحقیق

در این مقاله برای شناسایی آسیب با سناریوهای مختلف درنظر گرفته‌شده، برنامه‌ای کامپیوتری در محیط MATLAB نوشته شده‌است [20]. برای تحلیل اجزای محدود مسائل از نوع تنش یا کرنش مسطح، از المان‌های چهارضلعی و چهار گرهی استفاده شده‌است. این برنامه قادر است فرکانس‌های ارتعاش و شکل مودهای مربوط به هر مود ارتعاشی را محاسبه کند و آنها را برای استفاده در مرحلهٔ بهینه‌سازی ذخیره و استفاده نماید. برای یافتن محل خسارت و تعیین شدت‌های آنها از تکنیک‌های بهینه‌سازی شامل الگوریتم ژنتیک و روش اجتماع ذرات استفاده شده‌است. تابع هدف در روش بهینه‌سازی استفاده از داده‌های مودال (فرکانس‌ها و شکل مودها) در سازهٔ سالم و سازهٔ معیوب است. درادامه، به معرفی مدل اجزای محدود، نحوهٔ مدل‌سازی خرابی و شاخص تابع هدف (تابع شایستگی) پرداخته می‌شود.

مدل اجزای محدود

برای یافتن محل آسیب در سازه‌های دوبعدی بااستفاده از اطلاعات مودال، فرکانس‌های ارتعاش و شکل مودهای ارتعاشی سازه مورد نیاز می‌باشند. برای این منظور، از روش اجزای محدود برای استخراج اطلاعات مودی استفاده می‌شود. در این تحقیق، مطابق شکل (۱) برای مدل‌سازی هندسهٔ سازه‌ها، از المان‌های چهارضلعی با چهار نقطهٔ گوس استفاده شده‌است [21].



شکل۱ (a) هندسهٔ واقعی المان و (b) شکل نرمال‌شدهٔ المان در مدل المان محدود

باا ستفاده از م شخ صات گره‌ها، ات صال المان‌های شـــبکهٔ اجزای محدود و هم‌چنین پارامترهای مصـــالح، ماتریس‌های سختی و جرم هر المان باا ستفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه شده‌است.

$$k_e = \int B^T E B dA \quad ; \quad m_e = \int \rho N^T N dA \qquad (۱)$$

که در آن (B) ماتریس کرنش، (E) ماتریس مصالح، (N) ماتریس توابع شـــکل و ρ جرم حجمی مصـــالح می‌با شد. با سرهم کردن تمامی المان‌ها، ماتریس سختی (K) و ماتریس جرم سازه (M) حا صل می شود. سپس فرکانس‌های ارتعاش و شکل مودهای ارتعا شی از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود.

$$M\ddot{U} + KU = 0 \qquad (۲)$$

از روی ماتریس های ســـختی و جرم، از تکنیک زیرف ضا فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعا شی سازه محا سبه شدها ست [22]. برای این‌که بتوان سازهٔ آ سیب‌دیده را در مدل اجزای محدود شبیه سازی نمود، تأثیر آ سیب یا ترک در سازه به صورت کاهش سختی المان یا المان‌های موردمطالعه می‌با شد. با تغییر سختی سازه رفتار دینامیکی سازه عوض می شود و باعث تغییر در مشخصات مودال آن خواهد گردید.

مدل‌سازی خرابی

آسیب در یک سازه به‌طور معمول موجب کاهش سختی

سازه می‌شود و بر ماتریس جرم آن تأثیری نمی‌گذارد. آسیب در یک المان سازه‌ای با کاهش یکی از پارامترهای سختی مانند مدول الاستیسیته (E) و یا ممان اینرسی (I) شبیه‌سازی می‌شود [15]. در این تحقیق، باتوجه به دوبعدی بودن مسئله، مطابق رابطهٔ (۳) از کاهش مدول یانگ E استفاده شده‌است. میزان کاهش مدول الاستیسیته در حدود ۱۰٪ تا ۳۰٪ درنظر گرفته شده‌است.

$$E_d = (1-\Delta a_e)\, E_u \qquad (۳)$$

با کاهش مدول یانگ ماتریس سختی المان‌های سازه‌ای نیز کاهش می‌یابند. در اینجا فرض بر این است که کاهش سختی هر المان به‌طور یکنواخت در پهنهٔ المان صورت می‌گیرد. تغییر جزئی در سختی هر المان را می‌توان با شاخص خسارت Δa_e بیان نمود که در رابطهٔ (٤) نشان داده شده‌است.

$$\Delta K_e = (K_e)_u - (K_e)_d$$
$$(K_e)_d = (1-\Delta a_e)(K_e)_u \qquad (٤)$$

که در آن $(Ke)_u$ و $(Ke)_d$ به‌ترتیب ماتریس سختی المان e در سازهٔ سالم و سازهٔ آسیب‌دیده می‌باشد. ΔK_e تغییر سختی در المان e می‌باشد. مقدار Δa_e بین صفر و یک تغییر می‌کند که میزان از دست دادن سختی در المان را نشان می‌دهد. در روش ماتریس سختی، المان آسیب‌دیده را می‌توان باا ستفاده از رابطهٔ (٤) بیان نمود. المان e هنگامی سالم است که Δa_e برابر صفر باشد. وقتی سختی در المان e به‌طور کامل از بین می‌رود مقدار Δa_e برابر یک می‌شود.

تابع هدف یا تابع شایستگی

در این مقاله از ترکیب هم‌زمان شکل‌های مودی و فرکانس‌های ارتعاش سازه به‌عنوان تابع هدف برای تعیین شدت آسیب استفاده شده‌است [16]. بدین‌صورت که ابتدا فرکانس‌ها و شکل‌مودهای سازهٔ سالم استخراج می‌شوند. سپس بااستفاده از الگوریتم ژنتیک طرح‌های مختلفی برای المان‌های آسیب‌دیده درنظر گرفته می‌شود.

سپس تابع هدفی مطابق معادلهٔ (۵) تشکیل می‌گردد. درنهایت با بهینه کردن تابع هدف مقدار آسیب در هر المان به‌دست می‌آید. متغیر طراحی در این تابع هدف شماره و تعداد المان‌های مدل می‌باشد.

$$F(\alpha)=\left|\frac{\omega_j^d-\omega_j^u}{\omega_j^u}\right|+\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{ndf}(\varphi_{ij}^d-\varphi_{ij}^u)^2}{\sum_{i=1}^{ndf}(\varphi_{ij}^u)^2}}$$
$$\alpha=g(\text{Number of Elements, Element Index}) \qquad (۵)$$

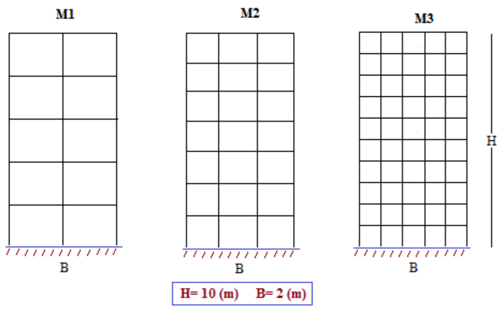
در تابع هدف ارائه‌شده، پارامترهای d و u به‌ترتیب اطلاعات سازهٔ معیوب و سازهٔ سالم می‌باشد. ω فرکانس سازه، j شمارهٔ مود، ndf تعداد کل درجهٔ آزادی و φ_{ij} بردار شکل مود jام در درجهٔ آزادی iام می‌باشد. با اجرای الگوریتم ژنتیک، αهایی تعیین می‌شوند که باعث مینیمم شدن $F(\alpha)$ می‌گردد.

با تحلیل دینامیکی سازه، اطلاعات مودی سازهٔ سالم به‌دست می‌آید و پس از ذخیره‌سازی این اطلاعات، با معرفی میزان خرابی در سازهٔ سالم اطلاعات مودال سازهٔ معیوب نیز محاسبه می‌گردد. جمعیت اولیه و تعداد تکرارهایی که به الگوریتم ژنتیک معرفی می‌شوند بستگی به تعداد شبکه‌های المان محدود سازه دارد که مثلاً با درنظر گرفتن یک سازه با ۱۰ المان، جمعیت اولیهٔ ۱۰۰ و تعداد تکرار ۲۰۰ تعیین شده‌است. اگر تعداد المان‌های سازه ٤۰ المان باشد بایستی جمعیت اولیهٔ این الگوریتم را ۲۰۰ و تکرار را ۵۰۰ درنظر گرفت تا الگوریتم به جواب قابل قبولی برسد. این الگوریتم برای هر متغیر طراحی تعداد تکراری که به معرفی شده‌است را باتوجه به جمعیت اولیه طی می‌کند و با تغییر درصد شاخص خرابی برای همین متغیر تکرار می‌شود. این روند تا به آنجا ادامه دارد که الگوریتم به بهینه‌ترین جواب برسد. اگر متغیر انتخابی آسیب‌دیده باشد، میزان آسیب در انتهای تحلیل در برداری نشان داده خواهد شد و اگر سالم باشد مقدار آن در بردار مربوط صفر خواهد بود. این روند برای کلیهٔ متغیرهای طراحی طی خواهد شد. در پایان تحلیل،

برداری به تعداد متغیرهای طراحی نشان داده می‌شود که میزان شدت آسیب در این بردار ذخیره شده‌است.

نتایج تحلیل

در این قسمت شناسایی محل آسیب مطابق سناریوهای درنظر گرفته‌شده برای سازه‌های دوبعدی مختلف با الگوریتم‌های ارائه‌شده در بخش‌های قبل ارائه شده‌است. در این نوع مدل‌سازی پاسخ‌های دینامیکی هر سازه به ابعاد شبکهٔ المان‌محدود و تعداد درجات آزادی سازه وابسته می‌باشد. ازاین‌رو یک مدل با شبکه‌بندی‌های متفاوت مطابق شکل (۲) درنظر گرفته شده‌است. مدل‌های موردنظر دارای درجات آزادی کم تا زیاد می‌باشند. مدل (M1) دارای ۱۰ المان، مدل (M2) دارای ۲۱ المان و مدل (M3) دارای ۵۰ المان می‌باشد. ابعاد سازه و مشخصات مصالح در هر سه مدل یکسان درنظر گرفته شده‌است. در این سه مدل المان محدود، مدل (M3) دارای شبکه‌بندی المان محدود ریزتری است که این تعداد شبکه براساس سعی‌وخطا طوری به‌دست آمده‌است که مقادیر فرکانس‌های محاسبه‌شدهٔ آن با بیشتر کردن تعداد المان‌ها تغییر چندانی نکرده‌است؛ بنابراین می‌توان با اطمینان بهتری اظهار داشت که مقادیر مودال مدل (M3) نسبت به مدل‌های (M1) و (M2) دقیق‌تر است و می‌توان خطای محاسبات فرکانس‌ها را نسبت به این مدل مورد سنجش قرار داد.



شکل ۲ مدل‌های مختلف شبکهٔ اجزای محدود یک سازه برای تحلیل حساسیت فرکانس‌های ارتعاش

با تحلیل مودال این مدل‌ها، فرکانس‌های ارتعاشی ۵ مد اول برای بررسی تأثیر ابعاد شبکه در مقادیر فرکانس‌ها مطابق جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱ مقایسهٔ فرکانس‌های ۵ مد اول مدل‌های مختلف شکل (۲) (واحد رادیان بر ثانیه)

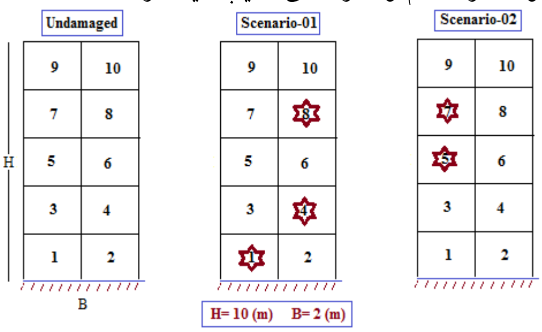
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
مدل (M1)	٧١/٥	٣٧٣/٥	٤٨٥/٨	٨٦٤/٦	١٣٦٨/٧
مدل (M2)	٦٧/٥	٣٦٠/٠	٤٨١/٤	٨٤١/٩	١٣٥٦/٢
مدل (M3)	٦٤/٠	٣٤٤/١	٤٧٩/٥	٨١٧/٦	١٣٤٨/٢

نتایج ارائه‌شده در جدول (۱) نشان می‌دهد که ریزتر کردن شبکهٔ مدل اجزای محدود باعث دقیق‌تر شدن فرکانس‌های ارتعاش شده‌است؛ لیکن نتایج نشان می‌دهند که تغییرات فرکانس‌ها برای مدل‌های مختلف خیلی شدید نمی‌باشد. همان‌طور که در بند ۳ اشاره شد، اگر مقادیر مدل (M3) به‌دلیل دقت خوب و شبکه‌بندی ریزی که دارد، به‌عنوان فرکانس‌های دقیق درنظر گرفته شود، فرکانس مد اول حدود ۱۲ درصد خطا را نشان می‌دهد و برای مد پنجم خطا حدود ۱/۵ درصد می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، شناسایی آسیب باوجود مدل اجزای محدود هزینهٔ محاسباتی سنگینی را طلب می‌نماید. با تکنیک افزایش ابعاد شبکهٔ اجزای محدود می‌توان زمان محاسبات را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد؛ بنابراین در این تحقیق به‌جای استفاده از مدل عددی با تعداد شبکه‌های زیاد از شبکه‌بندی درشت برای کاهش زمان محاسبات استفاده شده‌است؛ لذا در تحلیل نتایج مدل‌هایی مانند (M1) با شبکه‌بندی درشت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هرچند در کاربردهای واقعی درصورتی‌که ترک‌های ریزی در سازه موجود باشد، بایستی ابعاد المان‌ها را تا حد زیادی کاهش داد که ترک‌های ریز قابل‌شناسایی باشند. این کار مستلزم استفاده از سیستم‌های پردازش موازی است.

مدل سازه‌ای با رفتار خمشی

در این قسمت یک مسئلهٔ تنش مسطح به‌صورت یک

دیواری به‌عرض ۲ متر، ارتفاع ۱۰ متر و ضخامت ۱ متر موردنظر می‌باشد که از ۱۰ المان به‌ابعاد ۱ در ۲ متر تشکیل شده‌است (شکل ۳). از دیدگاه تحلیل سازه این مسئله مانند یک تیر برنولی عمل می‌کند و در مدل‌سازی اجزای محدود می‌توان آن را مانند یک تیر طره با رفتار خمشی مدل‌سازی نمود. مدول یانگ ۲۲/٤ گیگا پاسکال و جرم مخصوص مصالح به‌کاررفته ۲٤٤۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. دو سناریوی آسیب برای تشخیص سطوح شناسایی آسیب مطابق شکل (۳) طراحی شده‌است. در سناریوی اول میزان آسیب در المان‌های شمارهٔ ۱ و ٤ و ۸ به‌ترتیب ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۱۵٪ (کاهش سختی مدول یانگ) درنظر گرفته شده‌است. هم‌چنین در سناریوی دوم میزان آسیب در المان‌های شمارهٔ ۵ و ۷ به‌ترتیب ۱۰٪ و ۳۰٪ (کاهش سختی مدول یانگ) درنظر گرفته شده‌است. جمعیت اولیهٔ الگوریتم ژنتیک ۱۰۰ و تعداد تکرارها ۵۰۰ فرض شده‌است. تعداد متغیرهای طراحی معرفی‌شده به الگوریتم باتوجه به تعداد المان‌های سازه برابر ۱۰ می‌باشد. در جدول (۲) مقادیر ۵ فرکانس اول سازه سالم و سازه های آسیب دیده ارائه شده است.



شکل ۳ سناریوهای مختلف آسیب برای سازه به‌ابعاد ۲ در ۱۰ متر

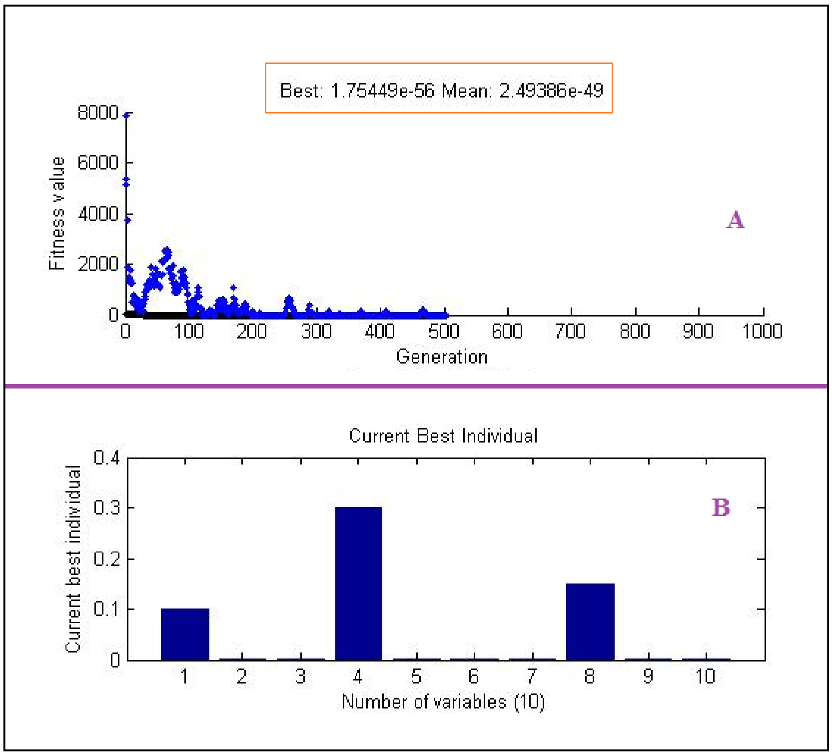
جدول ۲ مقادیر پنج فرکانس اول سازه‌های سالم و معیوب با سناریوهای آسیب اول و دوم (رادیان بر ثانیه)

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
سازهٔ سالم	۷۱/۵	۳۷۳/۵	٤۸۵/۸	۸٦٤/٦	۱۳٦۸/۷
سناریوی ۱	٦۸/٤	۳٦۲/۱	٤٦۵/۹	۸۳۵/۸	۱۳۲۳/٤
سناریوی ۲	۷۱/۱	۳٦۲/۳	٤۷۹/۷	۸۳۸/۰	۱۳۲۹/۰

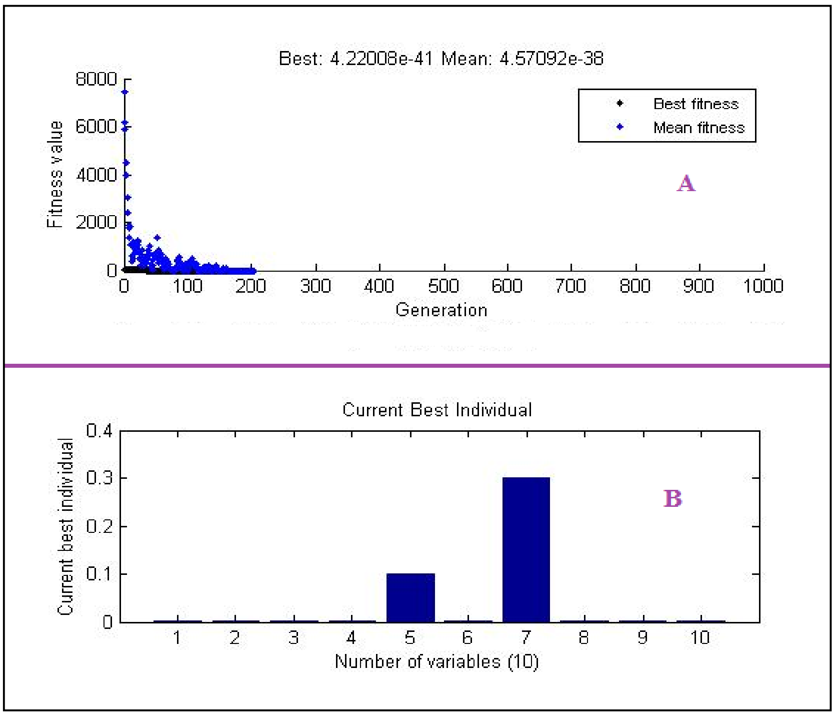
در سناریوی اول آسیب در المان‌های شمارهٔ ۱، ٤ و ۸ به ترتیب ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۱۵٪ درنظر گرفته شده است. برای تعیین آسیب پنج مود اول سازه درنظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در نمودار بخش A شکل (٤) مشخص است، پراکندگی داده‌های الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن بهترین افراد یا همان تعیین آسیب می‌باشد، که در تکرار ۵۰۰ به بهترین نقطهٔ بهینه‌سازی رسیده‌است. مطابق نمودار بخش B شکل (٤) سه سطح شناسایی آسیب تعیین شده‌است که المان‌های مشخص‌شده در سناریوی دوم می‌باشند. هزینهٔ محاسبات برای شناسایی خرابی در این سناریو با ۱۰ المان حدود ٤۸ ساعت به‌طول انجامیده‌است.

در سناریوی دوم، آسیب در المان‌های شمارهٔ ۵ و ۷ به‌ترتیب ۱۰٪ و ۳۰٪ درنظر گرفته شده‌است؛ مانند حالت قبل برای تعیین آسیب پنج مود اول سازه درنظر گرفته می‌شود. باتوجه به این‌که در این سناریو میزان آسیب فقط در دو المان می‌باشد تعداد تکرارهای الگوریتم نسبت به سناریوی قبل که سه المان آسیب‌دیده بودند، کمتر می‌باشد. مطابق این سناریوی آسیب، جمعیت اولیهٔ الگوریتم ژنتیک ۱۰۰ و تعداد تکرار ۲۰۰ درنظر گرفته می‌شود. متغیر طراحی معرفی‌شده به الگوریتم ژنتیک باتوجه به تعداد المان‌های سازه ۱۰ می‌باشد (شکل ۵).

همان‌طور که در نمودار (۵) نشان داده شده‌است، بهترین نقطهٔ بهینه‌سازی در مقدار ۲۰۰ ثبت شده‌است که این نشان‌دهندهٔ آن است که در این نقطه الگوریتم ژنتیک مقدار تابع هدف را به کمترین مقدار و به بهترین تولید نسل یا در اینجا مقدار آسیب رسانیده‌است. در این نقطه، شدت آسیب در این سازه طبق نمودار B شکل (٤) مشخص می‌شود. طبق این نمودار المان‌های شمارهٔ ۵ و ۷ به‌ترتیب ۱۰٪ و ۳۰٪ آسیب دیده‌اند. مدت‌زمان لازم برای محاسبهٔ تشخیص خرابی در این سناریو به‌طور متوسط ٤۸ ساعت بوده‌است.



شکل ٤ نتیجهٔ شناسایی آسیب در سناریوی اول



شکل ٥ نتیجهٔ شناسایی آسیب در سناریوی دوم

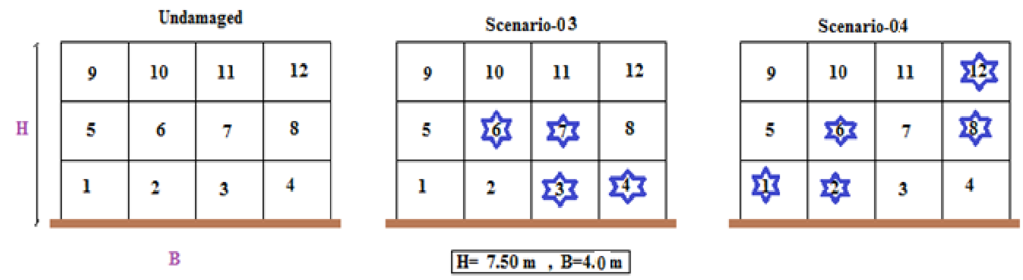
مدل سازه‌ای با رفتار برشی

این سازه یک مسئلهٔ تنش مسطح به‌صورت یک دیوار بتنی به‌عرض ۴/۰ متر، ارتفاع ۷/۵ متر و ضخامت ۱ متر می‌باشد که از ۱۲ المان به‌ابعاد ۱ متر در ۲/۵ متر تشکیل شده‌است. از دیدگاه سازه‌ای این مسئله مانند یک تیر تیموشنکو عمل می‌کند و در مدل‌سازی اجزای محدود می‌توان آن را مانند یک تیر طره با رفتار برشی مدل‌سازی نمود، مدول یانگ ۲۲/۴ گیگا پاسکال و جرم مخصوص مصالح به‌کاررفته ۲۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد؛ مانند مسئلهٔ قبل در این مدل نیز مطابق شکل (۶) دو سناریوی آسیب برای تشخیص سطوح شناسایی آسیب طراحی شده‌است. در سناریوی سوم المان‌های ۳، ٤، ٦ و ۷ به‌ترتیب ۱۰٪ و ۱۵٪ و ۳۰٪ و ۲۰٪ آسیب دیده‌اند. در سناریوی چهارم المان‌های ۱،۲، ٦، ۸ و ۱۲ به‌ترتیب ۳۰٪ و ۲۰٪ و ۱۵٪ و ۱۰٪ و ۲۰٪ آسیب دیده‌اند. جمعیت اولیهٔ الگوریتم ژنتیک ۲۰۰ و تعداد تکرارها ۷۰۰ درنظر گرفته شده‌است. تعداد متغیرهای طراحی معرفی‌شده به الگوریتم باتوجه به المان‌های سازه ۱۲ می‌باشد. در این مسئله نیز از پنج مود اول ارتعاشی سازه برای تعیین آسیب استفاده شده‌است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در این نقطه، تعداد تکرار ۷۰۰، الگوریتم ژنتیک مقدار تابع هدف را به کمترین مقدار یا در اینجا مقدار آسیب رسانیده‌است. در بهترین نسل شدت آسیب در این سازه طبق نمودار B مشخص شده‌است. نمودار B نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک به‌خوبی توانسته‌است المان‌های آسیب‌دیده را شناسایی کند. در این سناریو مدت‌زمان لازم برای انجام تحلیل تشخیص خرابی به‌طور متوسط ٦۰ ساعت بوده‌است. باتوجه به بیشتر شدن تعداد المان‌ها و افزایش شبکه‌بندی سازه، مشاهده می‌شود که زمان تحلیل سازه برای شناسایی آسیب به‌شدت افزایش یافته‌است.

در سناریوی چهارم آسیب در المان‌های شمارهٔ ۱، ۲، ٦، ۸ و ۱۲ به‌ترتیب ۳۰٪، ۲۰٪، ۱۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ درنظر گرفته شده‌است. در این سناریو نیز برای تعیین آسیب پنج مود اول ارتعاشی اعمال شده‌است. باتوجه به این‌که در این طرح میزان آسیب در پنج المان می‌باشد تعداد تکرارهای الگوریتم نسبت به سناریوی قبل که سه المان آسیب‌دیده بودند، بیشتر شده‌است. مطابق این سناریوی آسیب، جمعیت اولیهٔ الگوریتم ژنتیک ۲۰۰ و تعداد تکرار ۸۰۰ درنظر گرفته می‌شود. متغیر طراحی معرفی‌شده به الگوریتم ژنتیک باتوجه به تعداد المان‌های سازه ۱۲ می‌باشد.

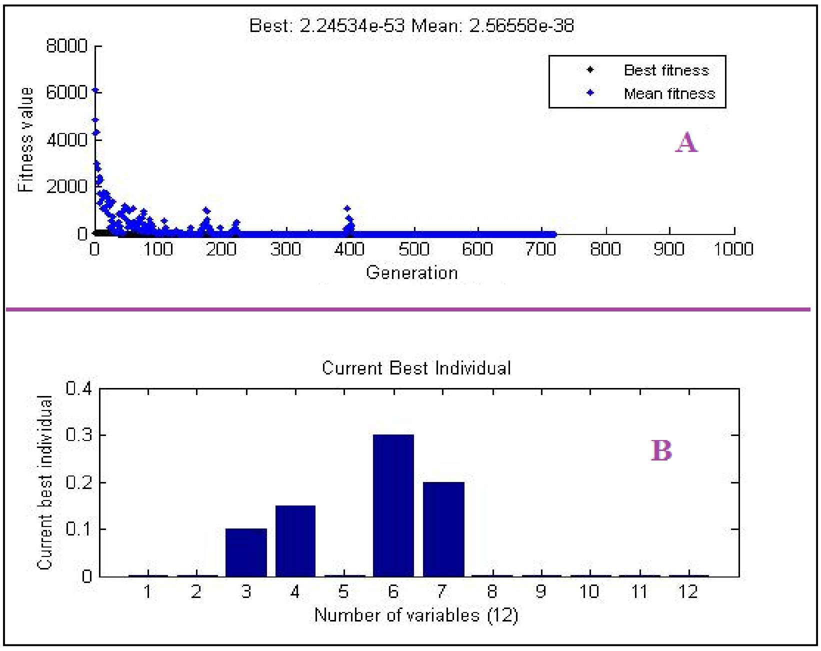
در جدول(۳) مقادیر ۵ فرکانس اول سازه سالم و سازه های معیوب ارائه شده است.



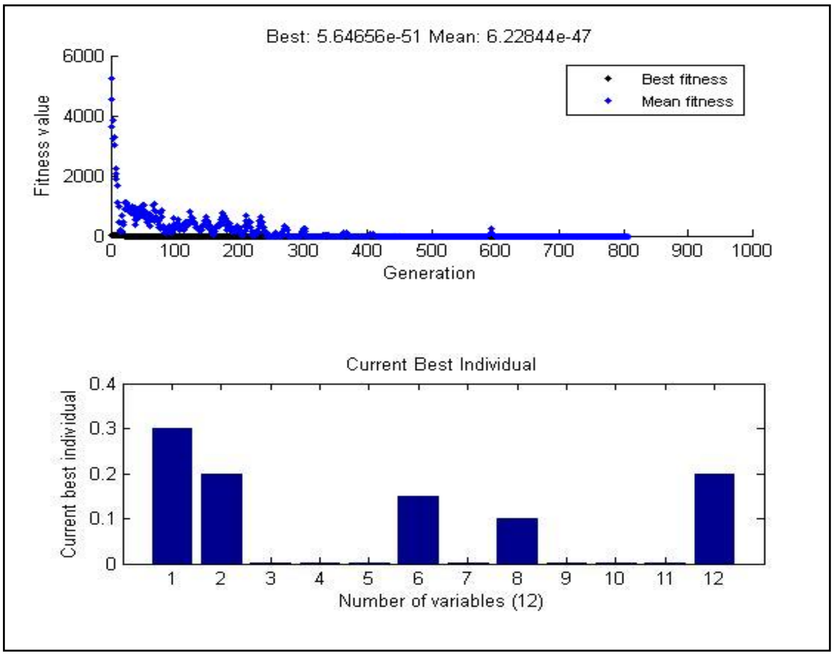
شکل ٦ سناریوهای سوم و چهارم برای سازه به ابعاد ٤ در ۷/۵ متر (اشکال بدون مقیاس می‌باشند)

جدول ۳ مقادیر پنج فرکانس اول سازه‌های سالم و معیوب با سناریوهای آسیب سوم و چهارم (رادیان بر ثانیه)

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
سازهٔ سالم	٤٤٥۳	٤۸۹۹	٥۲٥۹	٥۷۸٤	٦۲٥۱
سناریوی ۳	٤۳٦۰	٤۸۰۲	٥۰۹۹	٥۷٤۱	٦۱۲۹
سناریوی ٤	٤۲۸۹	٤٦۷۷	٥۰٤۳	٥٥٦٤	٦۱۰۱



شکل ۷ نتیجهٔ شناسایی آسیب در سناریوی سوم



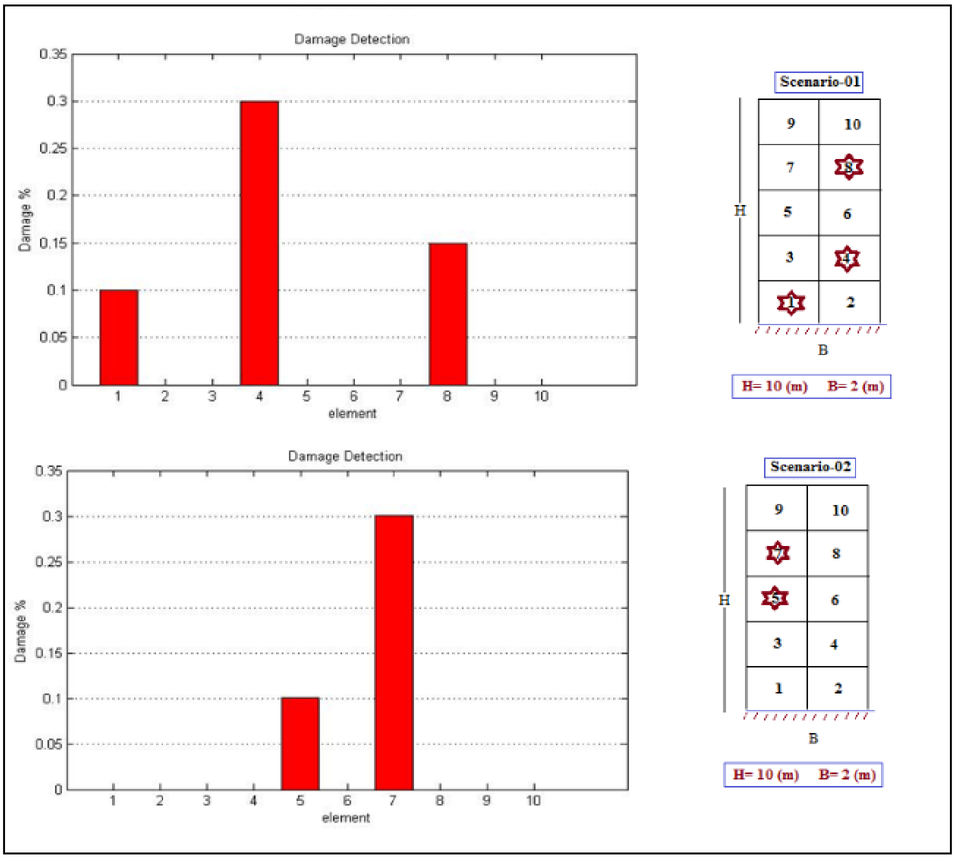
شکل ۸ نتیجهٔ شناسایی آسیب در سناریوی چهارم

مطابق شکل (۸) الگوریتم ژنتیک با بهینه‌سازی تابع هدف که مقادیر آن شکل مودها و فرکانس‌های سازه در حالت سالم و آسیب‌دیده می‌باشند، توانسته‌است موقعیت و شدت آسیب در این سازه را تعیین نماید. از مقایسه‌ای که بین نمودارهای نقاط بهینه‌سازی در یک سازه با دو سناریوی آسیب مختلف قابل توجه‌است، میزان پراکندگی

داده‌های تابع هدف می‌باشد. رسیدن به جواب بهینه به محل، موقعیت و اندازهٔ ترک نیز وابسته است. هرچه موقعیت ترک در قسمت‌های مختلف سازه باشد و فاصلهٔ آنها نسبت به هم بیشتر باشد، میزان پراکندگی داده‌های الگوریتم برای شناسایی محل و موقعیت ترک بیشتر خواهد بود. تحلیل سیستم کامپیوتری برای شناسایی خرابی در این سناریو با ۱۲ المان به‌طور متوسط مدت ٦۰ ساعت به‌طول انجامیده‌است.

کاهش زمان محاسبات

از نتایج تشخیص خرابی در سازه‌های دوبعدی توسط الگوریتم ژنتیک این نکته قابل‌توجه است که مدت‌زمان لازم برای تحلیل این سازه‌ها با بیشتر شدن تعداد المان‌ها در شبکه‌بندی‌های مدل اجزای محدود در سازه به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد که این موضوع برای تحلیل سازه‌هایی با درجات آزادی زیاد اقتصادی نیست و نیازمند سیستم‌هایی با قدرت پردازش بالا می‌باشد. ازاین‌رو برای کاهش مدت‌زمان لازم برای شناسایی آسیب در سازه‌های دوبعدی در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات استفاده می‌شود [23]. برای این منظور، مشخصات مدل سازه‌ای با رفتار خمشی که در قسمت تحلیل نتایج مشخصات آن ارائه شده است، مجدداً با الگوریتم اجتماع ذرات تحلیل می‌شود تا معیاری برای کاهش زمان محاسبات به دست آید.



شکل ۹ نتیجهٔ شناسایی آسیب در سناریوهای اول و دوم با روش اجتماع ذرات

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، المان‌های ۱، ٤ و ۸ به‌ترتیب دارای ۱۰٪، ۳۰٪ و ۱۵٪ آسیب می‌باشند که الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات به‌خوبی توانسته‌است آنها را با بهینه‌سازی تابع هدف براساس پارامترهای مودال شناسایی کند. نکتهٔ قابل‌توجه در تحلیل با این الگوریتم این است که مدت‌زمان لازم برای محاسبهٔ تشخیص خرابی در این سناریو به‌طور متوسط ۲۰ ساعت بوده‌است که در مثال مشابه آن، بهینه-سازی توسط الگوریتم ژنتیک مدت‌زمان لازم برای شناسایی آسیب به‌طور متوسط ٤۸ ساعت بوده‌است. در سناریوی دوم نیز المان‌های ۵ و ۷ به‌ترتیب دارای ۱۰٪ و ۳۰٪ آسیب می‌باشند که الگوریتم اجتماع ذرات به‌خوبی توانسته هم شدت و هم موقعیت خرابی را شناسایی نماید. برای شناسایی آسیب توسط الگوریتم اجتماع ذرات، تعداد تکرار ۵۰ و تعداد ذرات اولیه برای شروع محاسبات در این سناریو ۱۵۰ درنظر گرفته شده‌است. متغیر طراحی معرفی شده به الگوریتم ۱۰ می‌باشد.

باتوجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود که بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) هر دو می‌توانند سطوح شناسایی آسیب (وجود آسیب، مکان آسیب و شدت آسیب) در سازه‌های دوبعدی را تعیین کنند. از طرفی مدت‌زمان تحلیل الگوریتم (PSO) نسبت به الگوریتم (GA) کمتر می‌باشد که برای تحلیل مسائل دوبعدی تشخیص آسیب عملکرد بهتری دارد. مزیت دیگر الگوریتم (PSO)، تعیین مقدار تابع هدف در نقطهٔ بهینه می‌باشد که به‌مراتب کمتر از الگوریتم GA می‌باشد.

نتیجه‌گیری و بحث

در این تحقیق شناسایی آسیب سازه‌های دوبعدی از روش‌های الگوریتم ژنتیک و روش اجتماع ذرات مورد مطالعه قرار گرفت. بااستفاده از اطلاعات تحلیل دینامیکی مدل و استفاده هم‌زمان از فرکانس‌ها و مودشکل‌ها و مقایسه سازهٔ سالم و آسیب‌دیده توسط تابع هدف وجود آسیب، مکان آسیب و شدت آسیب در سازه را تعیین گردید. مهم‌ترین یافته‌های این مقاله به‌شرح زیر می‌باشد.

۱. شناسایی آسیب در سازه‌های پیوسته تنش- کرنش مسطح با موفقیت بااستفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرگرادیانی امکان‌پذیر می‌باشد.

۲. مدت‌زمان لازم برای شناسایی آسیب با افزایش درجات آزادی و ریزتر شدن شبکه‌ها به‌شدت افزایش می‌یابد. هرچند روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات زمان محاسبات کمتری را می‌طلبد، لیکن درصورتی‌که درجات آزادی مدل المان محدود زیاد باشد، مدت‌زمان یافتن آسیب برای این سازه‌ها ممکن است به‌طور متوسط ۱۵ روز به طول انجامد که به هیچ عنوان اقتصادی نمی‌باشد.

۳. درصورت استفاده از داده‌های فرکانسی و شکل‌های مودی به‌کارگیری شبکه‌بندی درشت یک راهکار مناسب برای کاهش هزینهٔ محاسبات می‌باشد. هرچند در کاربردهای واقعی درصورتی‌که ترک‌های ریزی در سازه موجود باشند، بایستی ابعاد المان‌ها را تا حدی کاهش داد که ترک‌های ریز قابل‌شناسایی باشند. این کار مستلزم استفاده از سیستم‌های پردازش موازی است.

٤. هرچند استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی غیرگرادیانی نظیر الگوریتم ژنتیک یا اجتماع ذرات به‌سادگی در شناسایی آسیب قابل استفاده می‌باشند، لیکن در کاربردهای واقعی برای شناسایی آسیب در مسائل دو و سه‌بعدی بسیار ناتوان می‌باشند. بهترین راهکار در این‌گونه مسائل استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرادیانی نظیر برنامه‌ریزی مربعی متوالی (Sequential Quadratic Programming (SQP)) می‌باشد که زمان آنالیز را به‌شدت کاهش می‌دهد. لیکن برنامه‌نویسی آن در شناسایی آسیب دشوار است و نیاز به محاسبهٔ گرادیان‌های تابع هدف و قیود می‌باشد که محاسبهٔ آنها مستلزم برنامه‌نویسی گسترده است.

مراجع

1. Doebling, Scott W., Charles R. Farrar, Michael B. Prime, and Daniel W. Shevitz, "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review", No. LA-13070-MS. Los Alamos National Lab., NM (United States), (1996).
2. Hejll, A, "Civil Structural Health Monitoring: Strategies, Methods and Applications", (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet), (2007).
3. Farrar, C. R., & Jauregui, D. A, "Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Bridge": II. Numerical study. Smart materials and structures, Vol.7, No. 5, pp.720, (1998).
4. Friswell, M., & Mottershead, J. E, "Finite Element Model Updating in Structural Ddynamics", *Springer Science & Business Media*, Vol. 38, (1995).
5. Allemang, R. J, "The Modal Assurance Criterion–twenty Years of Use and Abuse", *Sound and vibration*, Vol. 37, No.8, pp.14-23, (2003).
6. Aktan, A. E., Lee, K. L., Chuntavan, C., & Aksel, T, "Modal Testing for Structural Identification and Condition Assessment of Constructed Facilities", *In Proceedings-spie the International Society for Optical Engineering*, pp. 462-462, (1994).
7. Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J., & Stone, B. J, "A Vibration Technique for Non-destructively Assessing the Integrity of Structures", *Journal of Mechanical Engineering Science,* Vol. 20, No.2, pp.93-100, (1978).
8. Stubbs, N., & Osegueda, R, "Global Damage Detection in Solids- Experimental Verification International", *Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis,* Vol.5, pp.81-97, (1990)
9. Chen, H. P., & Bicanic, N, "Inverse Damage Prediction in Structures Using Nonlinear Dynamic Perturbation Theory", *Computational Mechanics*, Vol. 37, No. 5, pp.455-467, (2006).
10. Yang, Q. W., & Sun, B. X, "Structural Damage Identification Based on Best Achievable Flexibility Change", Applied Mathematical Modelling, Vol. 35, No.10, pp.5217-5224, (2001).
11. Khoo, L. M., Mantena, P. R., & Jadhav, P, "Structural Damage Assessment Using Vibration Modal Analysis", *Structural Health Monitoring*, Vol. 3, No.2, pp.177-194, (2004).
12. Frýba, L., & Pirner, M., "Load Tests and Modal Analysis of Bridges", *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 1, pp.102-109, (2001)
13. Narayana, K. L., & Jebaraj, C., "Sensitivity Analysis of Local/global Modal Parameters for Identification of a Crack in a Beam", *Journal of Sound and Vibration,* Vol.228, No.5, pp.977-994, (1999).

14. Liu, P. L., "Identification and Damage Detection of Trusses Using Modal Data", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No.4, 599-608, (1995).
15. Dessi, D., & Camerlengo, G., "Damage Identification Techniques Via Modal Curvature Analysis: Overview and Comparison", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 52, pp.181-205, (2015).
16. Chang, K. C., & Kim, C. W., "Modal-parameter Identification and Vibration-based Damage Detection of a Damaged Steel Truss Bridge", *Engineering Structures*, Vol.122, pp. 156-173, (2016).
17. Kim, J. T., Ryu, Y. S., Cho, H. M., & Stubbs, N., "Damage Identification in Beam-type Structures: Frequency-based Method vs Mode-shape-based Method", *Engineering structures*, Vol. 25, No.1, pp.57-67, (2003).
18. Lee, Y. S., & Chung, M. J., "A Study on Crack Detection Using Eigen-frequency Test Data", Computers & structures, Vol.77, No.3, pp.327-342, (2000).
19. Ndambi, J. M., Vantomme, J., & Harri, K.,"Damage Assessment in Reinforced Concrete Beams Using Eigen-frequencies and Mode Shape Derivatives", *Engineering Structures*, Vol. 24, No.4, 501-515, (2002).
20. MATLAB, "The Language of Technical Computing", Version 9.0.0. The Math-works Inc.: Natick, MA, (2016).
21. Cook, R. D., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, (2007).
22. Chopra, A. K., "Dynamics of Structures", *(4th edition), Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*, (2011).
23. Vesterstrom, J. S., Riget, J., & Krink, T., "Division of Labor in Particle Swarm Optimization in Evolutionary Computation", *CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on IEEE*, Vol. 2, pp. 1570-1575, (2002).

24.